

# PENGONTROLAN FLUKS DAN TORSI PADA MOTOR INDUKSI 3 FASA MENGGUNAKAN METODE *DIRECT TORQUE CONTROL* (DTC) BERBASIS PI DAN *FUZZY LOGIC CONTROLLERS* (FLC)

M. Nur Faizi<sup>1</sup>, Marzuarman<sup>2</sup>

Politeknik Negeri Bengkalis  
Jl. Bathin Alam, Sungai Alam, Bengkalis, Riau.  
Email : faizi@polbeng.ac.id

## Abstrak

Kontroler *Proporsional Integral* (PI) merupakan sebuah metode kontrol yang banyak diterapkan di bidang industri sampai saat ini. Kontroler ini memiliki parameter-parameter pengontrol, yaitu konstanta proporsional ( $K_p$ ) dan konstanta integral ( $K_i$ ). Pada metode PI konvensional, kedua parameter tersebut diturunkan dari perhitungan matematis. Kesulitan penalaan atau *Tuning* parameter-parameter tersebut akan ditemui bila *plant* yang dikendalikan adalah sistem dengan orde tinggi. Maka dari itu, diperlukan suatu metode penala PI yang lebih baik dan dapat diterapkan dalam sistem orde tinggi. Metode penalaan PI dengan logika *fuzzy* dapat dilakukan secara otomatis tanpa melakukan pemodelan sistem. Pada metode ini nilai  $K_p$  dan  $K_i$  ditentukan berdasarkan sejumlah aturan-aturan yang ditetapkan oleh logika *fuzzy*. *Input fuzzy* berupa *error* dan *delta error*. *Plant* yang dikontrol adalah motor induksi 3 fasa dengan metode *Direct Torque Control* (DTC). Pada pengujian didapatkan hasil penalaan parameter PI dengan logika *fuzzy* mampu menghasilkan tanggapan keluaran dengan *rise time* yang cepat, selisih tunak yang kecil, *overshoot* yang kecil, dan ketika sistem diberi gangguan, tanggapan keluaran akan tetap terjaga dalam kestabilan.

**Kata Kunci** - Kontroler *Proporsional Integral*, *Plant*, *fuzzy*, *rise time*, *Tuning*, *Overshoot*, *Direct Torque Control*, Motor Induksi.

## Abstract

Proportional Integral (PI) Controller is a method control which are widely applied in the field of industry until recently. This controller has a control parameters, namely constants proportional ( $K_p$ ) and constants integral ( $K_i$ ). In the conventional PI method, both parameters derived from mathematical calculations. Difficulty tuning of the parameters will be encountered if plant which is controlled is a system of high order. Therefore, need a better PI tuning methods and can be applied in high order system. PI tuning method with fuzzy logic can be done automatically without doing modeling system. In this method the value of  $K_p$  and  $K_i$  is determined based on a number of rules defined by fuzzy logic. Fuzzy input is error and delta error. The controlled plant is a 3 phase induction motor with *Direct Torque Control* (DTC). In the test results obtained parameter tuning PI with fuzzy logic capable of generating output responses with a fast rise time, difference a small steady, small overshoot, and when the system given a disturbance, the output response will remain intact in stability.

**Keyword**- Controller *Proporsional Integral*, *Plant*, *fuzzy*, *rise time*, *Tuning*, *Overshoot*, *Direct Torque Control*, Induction Motor.

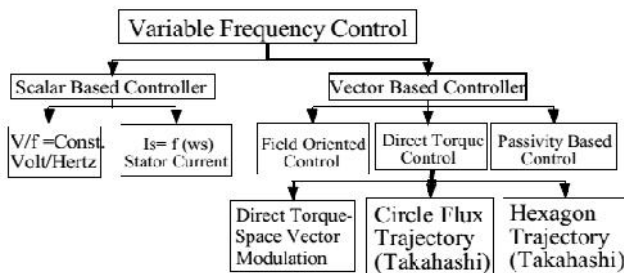
## 1. PENDAHULUAN

Secara umum salah satu metode pengaturan yang populer untuk pengaturan vektor adalah *Field Oriented Control* (FOC) yang diperkenalkan oleh F. Blaschke (*Direct FOC*) dan Hasse (*Indirect FOC*) diawal tahun 1970, di mana FOC dapat memberikan performa dan efisiensi tinggi untuk berbagai aplikasi industri. FOC bagus untuk menghasilkan performa dinamik tinggi, *ripple* torsi dan fluks yang rendah, tapi FOC memiliki kekurangan, seperti memerlukan pengaturan arus, membutuhkan 2 koordianat transformasi dan sensitifitas

parameter mesin yang tinggi. Kekurangan ini dapat dieliminasi menggunakan *Direct Torque Control* (DTC) yang diusulkan oleh Isao Takahashi dan Toshihiko Noguchi, pada tahun 1980. Dibandingkan dengan FOC, DTC lebih sederhana dalam hal struktur, kebutuhan komputasi yang sedikit, efisiensi dan performa yang tinggi [1].

*Direct Torque Control* (DTC) merupakan salah satu skema pengaturan berdasarkan pengaturan fluks stator dan torsi yang memberikan respon cepat dan kokoh yang

diimplementasikan pada motor arus bolak-balik. DTC ini memiliki kelebihan antara lain lebih sederhana dan mempunyai performa dinamik yang baik serta tidak sensitif terhadap perubahan parameter, khususnya tahanan stator. Akan tetapi penggunaan DTC konvensional memiliki beberapa kekurangan yaitu dapat menimbulkan fluktuasi *ripple* fluks dan torsi yang tinggi saat kondisi *steady state* [3].



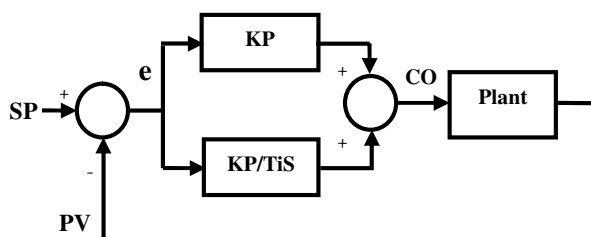
**Gambar 1.** Klasifikasi Metode Pengontrolan Motor Induksi

Logika *fuzzy* dapat digunakan untuk menala atau *men-tuning* parameter-parameter kendali konvensional seperti kontrol PI, logika *fuzzy* menerapkan suatu sistem kemampuan manusia untuk mengontrol sesuatu, yaitu dalam bentuk aturan-aturan Jika-Maka (*If-Then Rules*), sehingga proses pengontrolan akan mengikuti pendekatan secara linguistik. Pada penelitian ini dirancang suatu sistem pengontrolan fluks dan torsi pada motor induksi 3 fasa dengan memanfaatkan *Simulink* MATLAB. Metode PI sebagai kontroler, dan logika *fuzzy* sebagai metode penala konstanta kontrol PI dengan tujuan mendapatkan respon sistem yang baik yaitu *rise time* yang cepat dan *overshoot* yang minimal.

## 2. METODE

### 2.1 Kendali PI (*Proportional Integral*)

Untuk dapat mengimplementasikan sistem kontrol PI pada komputer, PI harus diubah ke dalam persamaan diskrit. Gambar 2 adalah blok sistem aksi kontrol PI [2].



**Gambar 2.** Diagram Blok Aksi Kontroler PI

Pengolahan parameter-parameter PI menjadi konstanta-konstanta pengendalian secara diskrit sesuai dengan penjelasan perhitungan berikut. Berdasarkan Persamaan 1 dan dengan menggunakan Transformasi *Laplace*, didapatkan persamaan PI dalam kawasan *s* sebagai berikut.

$$co(s) = K_p E(s) + \frac{K_p}{T_i s} E(s)$$

$$co(s) = \frac{K_p s E(s) + \frac{K_p}{T_i} E(s)}{s}$$

$$sco(s) = K_p s E(s) + \frac{K_p}{T_i} E(s) \quad (1)$$

Persamaan 1 diubah kembali ke kawasan waktu, sehingga menjadi :

$$\frac{dco(t)}{dt} = K_p \frac{de(t)}{dt} + \frac{K_p}{T_i} e(t) \quad (2)$$

Persamaan 2 diubah ke dalam bentuk diskrit, digunakan Persamaan *backward difference*, di mana:

$$\frac{dco(t)}{dt} = \frac{co(k) - co(k-1)}{T} + \frac{K_p}{T_i} e(t) \text{ dan}$$

$$\frac{d^2 co(t)}{dt^2} = \frac{co(k) - 2co(k-1) + co(k-2)}{T^2} + \frac{K_p}{T_i} e(t)$$

Sehingga Persamaan (2) menjadi:

$$\frac{co(k) - co(k-1)}{T} = K_p \left[ \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \right] + \frac{K_p}{T_i} e(k)$$

$$co(k) - co(k-1) = K_p [e(k) - e(k-1)] + \frac{K_p T}{T_i} e(k)$$

$$co(k) = co(k-1) + \left[ K_p + \frac{K_p T}{T_i} \right] e(k) - [K_p] e(k-1) \quad (3)$$

Persamaan 3 menunjukkan persamaan pengendali PI dalam bentuk diskrit. Dari Persamaan 3 dapat diketahui bahwa pengendali

PI menggunakan konstanta-konstanta pengendalian sebagai berikut:

$$co(k) = co(k-1) + K_2 e(k) - K_3 e(k-1) \quad (4)$$

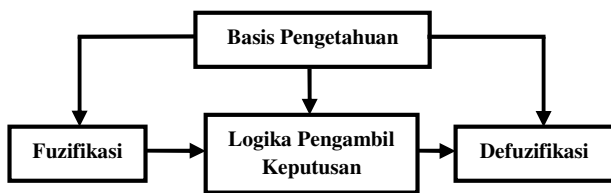
dengan

$$K_2 = (K_p + K_i) \Rightarrow K_1 = \frac{K_p T}{T_i} \quad (5)$$

$$K_3 = K_p \quad (6)$$

## 2.2 Logika Fuzzy

*Fuzzy* berarti samar, kabur atau tidak jelas. *Fuzzy* adalah istilah yang dipakai oleh Lotfi A Zadeh pada bulan Juli 1964 untuk menyatakan kelompok/himpunan yang dapat dibedakan dengan himpunan lain berdasarkan derajat keanggotaan dengan batasan yang tidak begitu jelas (samar), tidak seperti himpunan klasik yang membedakan keanggotaan himpunan menjadi dua, himpunan anggota atau bukan anggota. Gambar 3 menunjukkan struktur dasar pengendalian *Fuzzy*.

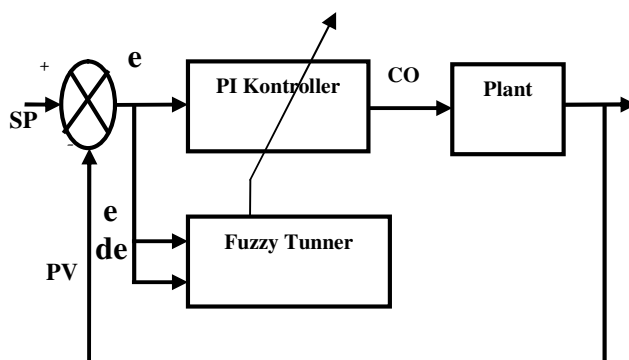


Gambar 3. Struktur Dasar Pengendali *Fuzzy*

Kendali logika *Fuzzy* dilakukan dalam tiga tahap, yaitu fuzzifikasi, evaluasi aturan dan defuzzifikasi. Komponen Fuzifikasi berfungsi untuk memetakan masukan data tegas ke dalam himpunan *Fuzzy* menjadi nilai *Fuzzy* dari beberapa variabel linguistik masukan.

## 2.3 Metode Fuzzy Multiterm Controllers

Pada metode *Fuzzy Multiterm Controllers*, logika *Fuzzy* akan dipergunakan untuk menala atau mengadaptasi sebuah kontroler *multiterm* seperti kontroler PD, PI atau PID seperti yang terlihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Kontroler PI yang diadaptasi oleh *Fuzzy* sebagai *Tuning*

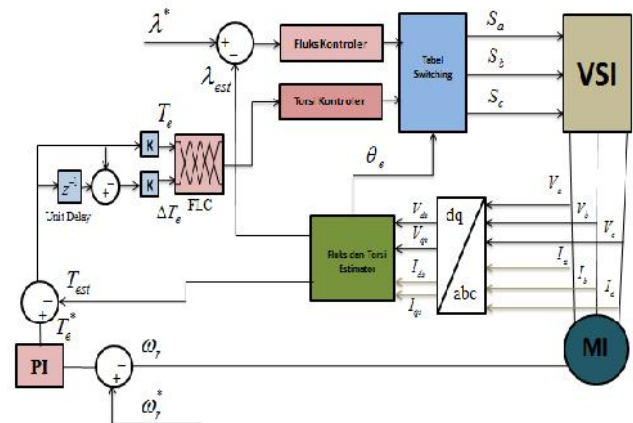
Kontroler PI dapat direpresentasikan oleh salah satu dari dua bentuk berikut yaitu:

1. Bentuk Kontinyu:  
 $co(k) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) dt$
2. Bentuk Diskrit:  
 $co(k) = K_p \cdot e(t) + K_i T_s \sum_{i=1}^n e(i)$

Dimana  $K_p$  dan  $K_i$  masing-masing adalah konstanta Proporsional, dan konstanta Integral, Nilai  $T_i = K_p/K_i$ , sering dikenal sebagai konstanta waktu integral,  $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$ ,  $T_s$  adalah periode sampling dan  $n$  adalah jumlah sampel data [6].

## 2.4 Perancangan Sistem

Blok perancangan sistem pengontrolan fluks dan torsi pada motoe induksi 3 fasa pada Penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 5.

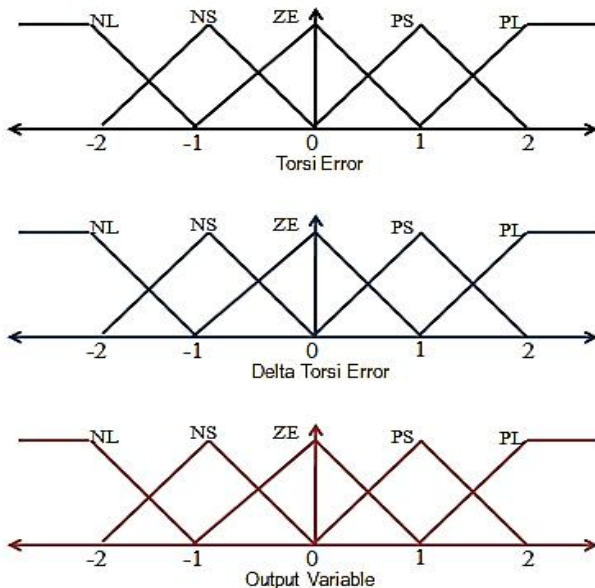


Gambar 5. Blok Diagram DTC Berbasis PI dan FLC Pada Motor Induksi 3 Fasa

Dari blok diagram Gambar 5. Dapat dijelaskan bahwa, keluaran inverter berupa tegangan tiga fasa sebagai masukan untuk motor induksi kemudian tegangan dan arus stator pada motor induksi yaitu  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$  dan  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  akan ditransformasi oleh blok abc ke dq dengan maksud untuk mengubah koordinat motor induksi dari 3 fasa kedalam koordinat 2 fasa. Hasil dari transformasi berupa tegangan  $d_s$ ,  $q_s$  dan arus  $d_s$ ,  $q_s$  inilah sebagai masukan untuk blok DTC estimator, sehingga keluaran dari DTC estimator yaitu torsi estimator akan dibandingkan dengan torsi error referensi (torsi hasil kontroler PI-FLC) dan fluks estimator akan dibandingkan dengan fluks referensi sedangkan sudut fluks stator sebagai masukan untuk blok *switching table* gunanya untuk mengontrol fluks stator dan torsi untuk memenuhi nilai referensi yang telah ditentukan. Selanjutnya putaran motor akan dibandingkan dengan putaran referensi dan hasil perbandingan inilah nantinya akan dikontrol menggunakan metode PI-FLC.

## 2.5 Program Fuzzy Sebagai Tuning Kontrol PI

Tahapan awal proses Fuzzifikasi adalah menentukan parameter-parameter fungsi keanggotaan pada setiap himpunan Fuzzy masukan. Pada pemrograman Fuzzifikasi ini digunakan parameter fungsi keanggotaan masukan berupa *error* dan *delta error*. Fungsi keanggotaan dapat dilihat pada Gambar 6.



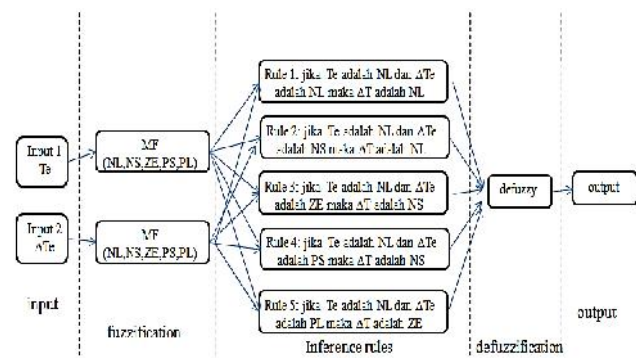
Gambar 6. Fungsi keanggotaan *error* torsi, *delta error* torsi dan *output variable*

Dalam fungsi keanggotaan fuzzy ada dua variabel *input* dan masing-masing variabel input

memiliki tujuh nilai linguistik, jadi  $7 \times 7 = 49$  aturan kontrol fuzzy berada dalam penalaran fuzzy seperti yang ditunjukkan pada Tabel. 1 dan *flowchart fuzzy logic controller* yang ditunjukkan pada Gambar 7.

Tabel 1. Rule base FLC

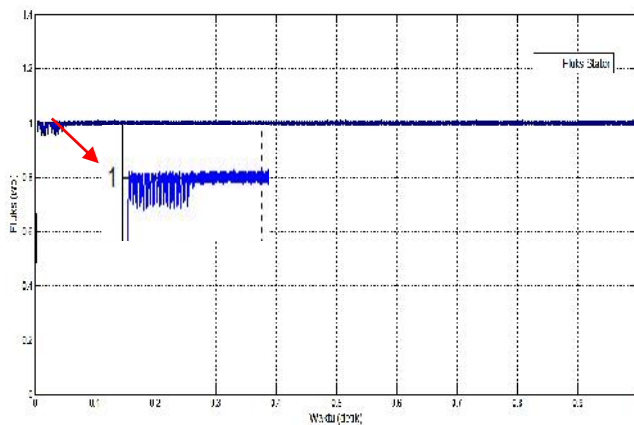
$\Delta T_e \backslash T_e$	NL	NS	ZE	PS	PL
NL	NL	NL	NS	NS	ZE
NS	NL	NS	NS	ZE	PS
ZE	NS	NS	ZE	PS	PS
PS	NS	ZE	PS	PS	PL
PL	ZE	PS	PS	PL	PL



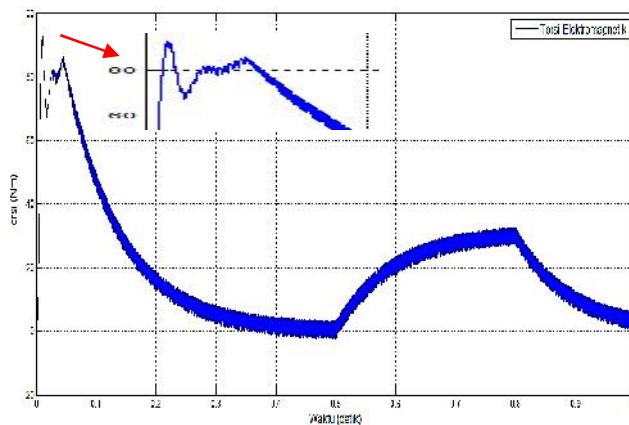
Gambar 7. Flowchart Fuzzy Logic Controller

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

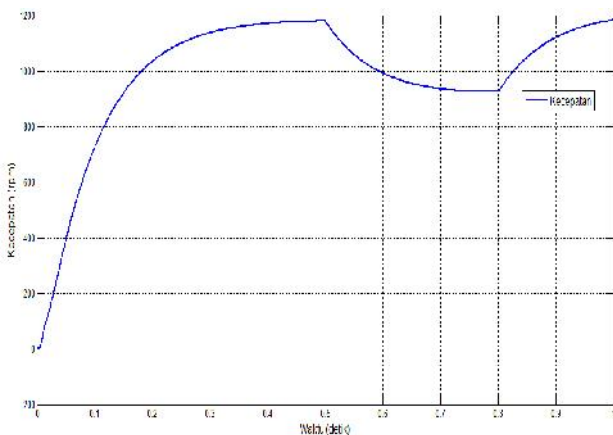
Pada simulasi ini dilakukan perbandingan antara model DTC Konvensional dan DTC PI-FLC pada motor induksi 3 fasa. Hasil simulasi pada DTC konvensional ditunjukkan pada Gambar 8, 9 dan 10 dimana menampilkan respon fluks stator, torsi dan kecepatan pada motor induksi. Torsi dibebani sebesar 30 Nm diterapkan pada 0.5 detik dan dihilangkan pada 0.8 detik. Kecepatan rotor dari 0 ke 1200 rpm.



**Gambar 8.** Respon fluks stator motor induksi dengan metode DTC konvensional

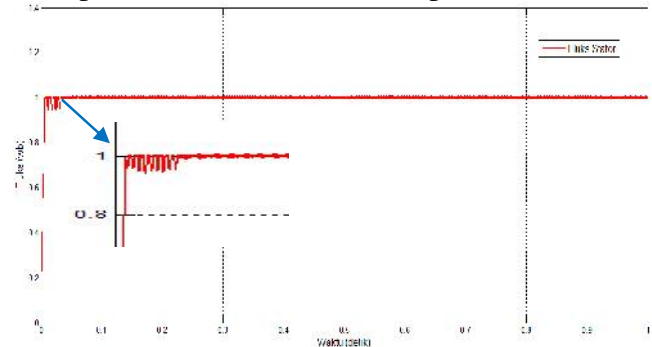


**Gambar 9.** Respon torsi motor induksi dengan metode DTC konvensional

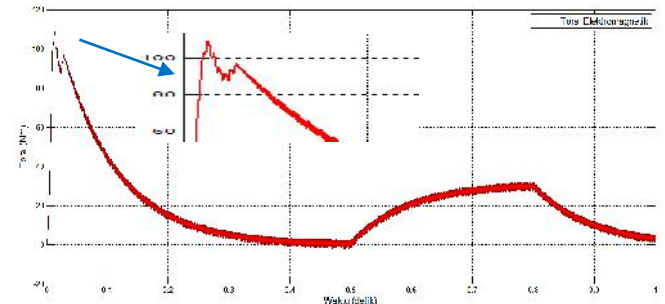


**Gambar 10.** Respon kecepatan motor induksi dengan metode DTC konvensional

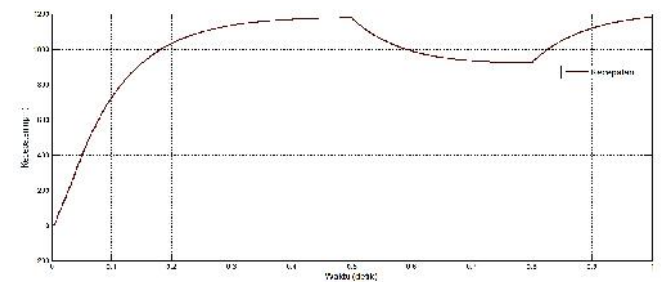
Pada Pengujian selanjutnya dilakukan penujian DTC berbasis PI-FLC pada motor induksi 3 fasa. Hasil simulasi pada DTC PI-FLC ditunjukkan pada Gambar 11, 12 dan 13 dimana Gambar tersebut menampilkan respon fluks stator, torsi dan kecepatan pada motor induksi. Torsi dibebani sebesar 30 Nm diterapkan pada 0.5 detik dan dihilangkan pada 0.8 detik. Kecepatan rotor dari 0 ke 1200 rpm.



**Gambar 11.** Respon fluks stator motor induksi dengan metode DTC PI-FLC



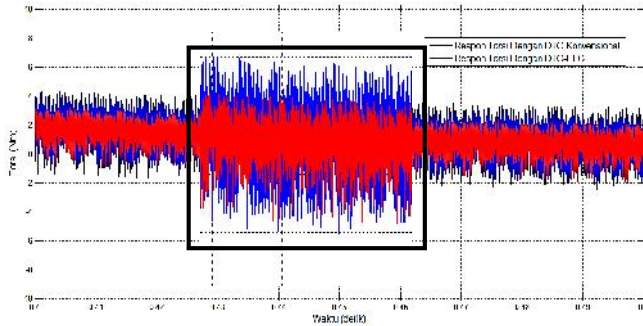
**Gambar 12.** Respon torsi motor induksi dengan metode DTC PI-FLC



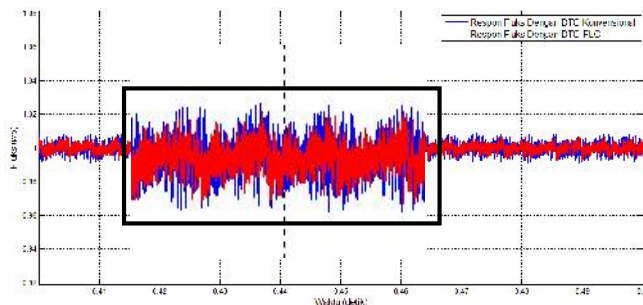
**Gambar 13.** Respon kecepatan motor induksi dengan metode DTC PI-FLC



Respon Torsi dan Fluks Stator diperluas Pada *Steady State* ditunjukkan pada 14 dan 15.



**Gambar 14.** Fluktuasi *ripple* torsi pada saat *steady state* antara DTC konvensional dengan DTC PI-FLC



**Gambar 15.** Fluktuasi *ripple* fluks pada saat *steady state* antara DTC konvensional dengan DTC PI-FLC

Gambar 14 dan 15 menunjukkan respon fluktuasi *ripple* fluks dan torsi diperluas hal ini dilakukan untuk mempermudah mengamati kedua respon tersebut (antara DTC konvensional dengan DTC berbasis PI-FLC). Gambar 14 dan 15 menggambarkan bahwa dengan menggunakan *Propotional Integral* dan *Fuzzy Logic Controller* (PI-FLC) pada pengontrolan motor induksi 3 fasa menggunakan metode *Direct Torque Control* (DTC) dapat meminimalkan fluktuasi *ripple* fluks dan torsi elektromagnetik

#### 4. KESIMPULAN

Sistem kontrol *Propotional Integral* dan *Fuzzy Logic Controller* (PI-FLC) untuk motor induksi dengan metode *Direct Torque Control* (DTC) dapat meminimalkan *ripple* fluks dan torsi.

respon fluks stator pada motor induksi dengan DTC menggunakan PI-FLC, pada motor induksi terjadi vibrasi pada saat kondisi *starting* awal. Kemudian pada saat waktu 0.1635 detik sampai dengan waktu seterusnya fluktuasi *ripple* fluks yang dihasilkan mengecil yaitu berkisar antara 1.452-1.468Wb.

Saran untuk penelitian lanjutan mengenai sistem pengontrolan motor induksi 3 fasa menggunakan metode *Direct Torque Control* (DTC) disamping meminimalkan fluktuasi *ripple* fluks dan torsi maka dipertahankan juga respon kecepatan bila diberikan beban lebih.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Dari hati yang paling dalam penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah terlibat dalam penelitian ini. Semoga jurnal ini bermanfaat bagi akademisi dan praktisi.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Mochammad Rameli .(2014), “Bahan Kuliah Pegaturan Mesin Listrik: Motor Listrik”. Teknik Sistem Pengaturan, Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [2] Hu, F.C., Hong, B. R., Liu, H.C. (2014), “Stability analysis and PI controller tuning for a speed sensorless vector-controlled induction motor drive”, *30th Annual Conference of IEEE Inds. Elec., Society, IECON*, vol.1, 2-6 Nov, Korea.
- [3] Ahammad, T., Beig, A.R., Al-Hosani, K. (2013), “An Improved Direct Torque Control of Induction Motor with Modified Sliding Mode Control Approach”. *IEEE 2013*
- [4] Aguilar, G.M., Cortez, L. (2012), “Implementation of the Direct Torque

Control (DTC) in current model, with current starting limiter”. Faculty of Sciences of the Electronics, BUAP Puebla, Mexico.

- [5] Sun, D. (2010), “Sliding Mode Direct Torque Control for Induction Motor with Robust Stator Flux observer”, IEEE 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, China.
- [6] Robyns, B., Franscois, B., Degobert, B., Hautier, P. J. (2012), “Vector Control of Induction Machines Desentisation and Optimisation through Fuzzy Logic”, Springer, France.
- [7] Ned, M. (2001), “Advanced Electric Drives”, MNPERE, United States of America.
- [8] Cao-Minh, T., Chakraborty, C., Hori, Y. (2009), “Efficiency Maximization of Induction Motor Drives for Electric Vehicles Based on Actual Measurement of Input Power”. Department of Electrical Engineering, University of Tokyo, Japan.
- [9] Wong, C. C., Chang, Y. S. (1998), “Parameter Selection in the Sliding Mode Control Design Using Genetic Algorithms”. Department of Electrical Engineering, Tamkang University, Taiwan.